

References

- Onishchenko G.G. Radiological and medical consequences of the Chernobyl accident in the Russian Federation. *Gigiena i sanitariya*. 2007; 86(4): 6–13. (in Russian)
- Onishchenko G.G. Chernobyl – 30 years later. Radiation-hygienic and medical consequences of the accident. *Radiatsionnaya gigiena*. 2016; 9(2): 10–9. (in Russian)
- Romanovich I.K., Bruk G.Ya., Barkovskiy A.N., Bratilova A.A., Gromov A.V., Kaduka M.V. Substantiation of the concept of the transition of settlements affected by the Chernobyl nuclear power plant accident to radioactive contamination zones to the conditions of normal life activity of the population. *Radiatsionnaya gigiena*. 2016; 9(1): 6–18. (in Russian)
- Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Avaliani S.L., Simitsyna O.O., Shashina T.A. Modern problems of assessing the risk of environmental factors affecting public health and ways to improve it. *Analiz riska zdorov'yu*. 2015; (2): 4–14. (in Russian)
- Rakhmanin Yu.A., Mikhaylova R.I. Environment and health: the priorities of preventive medicine. *Gigiena i sanitariya*. 2014; 93(5): 5–10. (in Russian)
- Onishchenko G.G., Pal'tsev M.A., Zverev V.V., Ivanov A.A., Kiselev V.I., Netsov S.V., et al. Biological Safety [Biologicheskaya bezopasnost']. Moscow: Meditsina; 2006. (in Russian)
- Onishchenko G.G. Radiation situation on the territory of the Russian Federation based on the results of radiation and hygienic certification. *Gigiena i sanitariya*. 2009; 88(3): 4–7. (in Russian)
- Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Avaliani S.L., Aleksandryan A.V., Shashina T.A., Skvortsova N.S., et al. Fundamentals of the Analysis of the Risk to Human Health from the Effects of Environmental Factors [Osnovy analiza riska zdorov'yu cheloveka ot vozdeystviya faktorov okruzhayushchey sredy]. Erevan; 2012. (in Russian)
- Korenkov I.P., Shandala N.K., Lashchenova T.N., Sobolev A.I. Protection of the Environment During the Operation and Decommissioning of Radiation-hazardous Facilities [Zashchita okruzhayushchey sredy pri ekspluatatsii i vyvode iz ekspluatatsii radiatsionno-opasnykh objektov]. Moscow: Binom; 2014. (in Russian)
- Korenkov I.P., Lashchenova T.N., Shandala N.K. Radioecological approaches to the ranking of radiation-hazardous objects. *Gigiena i sanitariya*. 2011; 90(4): 26–31. (in Russian)
- Bushmanov A.Yu., Biryukov A.P., Korovkina E.P., Kretov A.S., Bukhvostova N.N. Analysis of the regulatory and legal framework and the results of the activities of the interdepartmental expert councils on the establishment of a causal link between diseases, disability and death of Russian citizens exposed to radiation factors as a result of the Chernobyl disaster. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2016; 60(3): 103–8. (in Russian)
- Bushmanov A.Yu., Gus'kova A.K., Krasnyuk V.I., Galstyan I.V. Methodical Manual on the Establishment of Communication of Diseases with Exposure to Ionizing Radiation [Metodicheskoe posobie po ustanovleniyu svyazi zabozevaniy s vozdeystviem ioniziruyushchego izlucheniya]. Moscow: FMBT im. A.I. Burnazyana FMBA Rossii; 2009. (in Russian)
- Gus'kova A.K. Difficulties in examination in establishing the connection of diseases with the effects of radiation in the long term after irradiation and methods for their overcoming. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2010; 55(1): 81–5. (in Russian)
- Gus'kova A.K. Difficulties and errors in the interpretation of data on the relationship between morbidity and mortality of various categories of people with the effects of ionizing radiation. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2010; 55(6): 72–4. (in Russian)

Поступила 15.06.17
Принята к печати 05.07.17

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

УДК 614.777:546.11.02.3

Лашенцова Т.Н.¹, Бондарева Л.Г.², Фёдорова Н.Е.², Ракитский В.Н.²

ВЫЯВЛЕНИЕ ПУТЕЙ ПОСТУПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ПРЕСНОВОДНЫЕ ОРГАНИЗМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

¹ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, 123182, Москва;

²ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Россия, г. Мытищи, Московская область

*Потенциальными источниками поступления трития в экосистему р. Енисей являются глобальное загрязнение окружающей среды и деятельность Горно-химического комбината ГК Росатом. Изучалось распределение трития в органах пресноводной лучепёрой рыбы *Carassius gibelio* (серебряный карась) как растениеядного рода карасей семейства карповых для определения процессов накопления ЗН по пищевой цепи водные растения – рыбы в среде загрязнённых радионуклидами водных объектов. На первом этапе была проведена работа по аккумуляции трития биомассой растений-гидробионтов. Для этого по 3000 г биомассы в пересчёте на сырую массу разместили в аквариумах объемом 100 л с удельной активностью воды 100 кБк/л. В работе показано, что упомянутые водные растения активно аккумулируют внесённый тритий, накапливая до 70% радионуклида. При этом содержание органически связанного трития в биомассе увеличилась до 21% от всего накопившегося трития. Затем растения (роголистник, ярска) высушивали, смешивали с сухим кормом для рыб (1:1), а смесь прессовали в гранулы активностью каждая до 50 Бк. Гранулы использовали для насильственного кормления рыб; в ходе эксперимента каждая особь в течение 550 сут полотила до 330 кБк радионуклида трития. Исследования показали, что в мышечной ткани рыб присутствовало около 75% от всего накопленного количества трития. При определении содержания трития в белках и липидах в экспериментальных системах не выявлено особенностей в использовании роголистника и ярски как источника питания.*

Ключевые слова: тритий; рыба; река Енисей; ассимиляция.

Для цитирования: Лашенцова Т.Н., Бондарева Л.Г., Фёдорова Н.Е., Ракитский В.Н. Выявление путей поступления трития в пресноводные организмы при эксплуатации горно-химического комбината. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(9): 844–848. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-844-848>

Для корреспонденции: Бондарева Людия Георгиевна, ст. науч. сотр. отд. аналитических методов контроля ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, канд. хим. наук, доцент ВАК, ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана», 141014, Мытищи. E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Lashchenova T.N.¹, Bondareva L.G.², Fedorova N.E.², Rakitsky V.N.²

DETECTION OF PATHWAYS OF TRITIUM ENTRY INTO FRESHWATER ORGANISMS IN THE EXPLOITATION OF THE MINING AND CHEMICAL COMBINE

¹A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Centre, Moscow, 123182, Russian Federation;

²F.F. Erisman Federal Center of Hygiene, Mytishi, 141014, Moscow region, Russian Federation

*The global pollution of the environment and the functioning of the Mining and Chemical Combine (MCC), Rosatom State Corporation are potential sources of tritium in the Yenisei River ecosystem. The distribution of residual tritium in organs and tissues of the freshwater rayfined fish *Carassius gibelio* (Prussian carp) as a representative of the*

*Carassius phytophagous genus of Cyprinidae family was studied for the determination of the ^3H accumulation in the aquatic plants–fishes food chain in water bodies contaminated with radionuclides. At the first stage, the work was done on the accumulation of tritium by the biomass of hydrobiont plants. To do this, 3000 g of biomass in terms of wet weight were placed in aquaria with a volume of 100 liters with specific water activity of 100 kBq/l. The work shows mentioned aquatic plants to accumulate actively the introduced tritium, storing up to 70% of the radionuclide. At the same time, the content of organically bound tritium in biomass increased to 21% of total accumulated tritium. Then the plants (hornwort, duckweed) were dried, mixed with dry fish food (1: 1), and the mixture was compressed into pellets, each with activity up to 50 Bq. The pellets were used for forcible feeding of fish, during the experiment, each individual absorbed up to 330 kBq of tritium radionuclide for 550 days. Studies have shown about 75% of the total accumulated amount of tritium in fish specimens to present in muscle tissue. When determining the content of tritium in proteins and lipids in experimental systems, no specific features have been revealed in the use of *Ceratophyllum* and *Lemna* as a source of nutrition.*

Key words: tritium; fish; Yenisei River; assimilation.

For citation: Lashchenova T.N., Bondareva L.G., Fedorova N.E., Rakitsky V.N. Detection of pathway of tritium entry into freshwater organisms in the exploitation of the mining and chemical combine. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017; 96(9): 844-848. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-844-848>

For correspondence: Lydia G. Bondareva, MD, PhD, associate professor, senior researcher of the department of analytical methods of the F.F. Erisman Federal Center of Hygiene, Mytischki, 141014, Moscow region, Russian Federation. E-mail: lydiabondareva@gmail.com

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The work was performed with the partial financial support of Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-05-00205.

Received: 17 June 2017

Accepted: 05 July 2017

Введение

Концентрация природного трития в воде Мирового океана оценивается на уровне 0,1 Бк/л [1–3]. Тритий – изотоп биогенного элемента водорода, который при поступлении в организм относительно равномерно распределяется по всем органам и тканям независимо от пути поступления в организм. Тритий воздействует на организм, замещая простую воду (H_2O) и распадается с выходом бета-частиц и ядер гелия [4, 5].

Среди дозообразующих радионуклидов тритий является примером равномерного распределения его в организме с относительно быстрым формированием дозы во всех богатых жидкостью средах живых организмов [6–11].

Тритий в биологических организмах классифицируется двумя типами: свободная тритиевая вода (НТО) и органически связанный тритий (ОСТ) [7–11].

НТО вступает в процессы метаболизма как простая противая вода H_2O . А ОСТ обычно находится в связанном с С-С скелетной материей или как часть соединений, таких как -COOH, -OH, -SH и -NH. Такой вид связанного трития практически не обменивается со свободной тритиевой водой, хотя другие органические соединения достаточно быстро обмениваются с НТО атомами водорода и трития. Доля трития в виде необменного ОСТ может достигать 90% от всего содержания трития [7, 9, 11].

Тритий характеризуется высокой миграционной способностью, поэтому из окружающей среды мгновенно поступает во все звенья экологического кругооборота, замещая водород и обуславливая разрывы в цепочках РНК и ДНК в биологических структурах всех живых организмов [7, 9, 11–13]. Именно ОСТ, прошедший по всей пищевой цепи, является наиболее биологически опасным в сравнении с тритиевой водой (НТО), который также является источником и фактором облучения живых организмов.

Целью настоящих исследований является выявление путей поступления трития в пресноводные живые организмы на примере рыб и распределения трития по структурным частям в натурном и модельном эксперименте.

В Красноярском крае источником радиоактивного загрязнения окружающей среды долгое время являлся ФГУП «Горно-химический комбинат», расположенный в Железногорске на правом берегу р. Енисей, в 50 км ниже по течению от Красноярска. В связи с возрастанием потребления рыбной продукции во всем мире, население, проживающее по берегам р. Енисей, активно занимается рыболовством. Количество и качество этого продукта зависит от вида рыбы, от природы ее происхождения. Рыба может быть выращена в искусственных условиях в воде, поступающей из разных водоёмов, или выловлена из естественного

природного водоёма. В зависимости от природы ее происхождения зависит состояние кормовой базы и уровень накопления трития в рыбе.

Радиационный и химический анализы и оценка полученных литературных данных показали состояние поверхностной воды в среднем течении р. Енисей. До закрытия всех реакторов в мае 2010 г. существовало несколько вероятных потенциальных источников поступления трития в воду р. Енисей:

- тритий с водосборной территории, загрязнённой в результате испытаний ядерного оружия;
- тритий с водосборной территории, загрязнённой в результате аэрозольных выбросов ФГУП «Горно-химический комбинат»;
- тритий со сбросами воды из систем охлаждения реактора;
- тритий со сбросами низкоактивных жидких отходов, образовавшихся в результате работы радиохимического производства предприятия и др. [14–16].

Ранее были проведены натурные исследования по определению содержания трития в мышечной ткани основных видов промысловых рыб, выловленных в районах воздействия сбросов ФГУП «Горно-химического комбината»: выше точек сброса по течению (40 км), в ближней зоне сброса (0–15 км) и на значительном удалении от точки сброса (1760 км) [17]. Предварительные исследования позволили говорить о том, что для исследуемых видов рыб источником поступления трития в организм является пища [17].

Авторы этой работы представили подтверждение путей поступления трития в организм рыб в модельном эксперименте, провели изучение распределения трития по структурным частям рыбы на примере одного из видов пресноводных рыб – карася серебряного.

В качестве объекта исследования выбрали поверхностную воду р. Енисей и биологические объекты (водные растения и рыбу), которые отбирали ниже по течению р. Енисей от Горно-химического комбината. Основными пунктами контроля были выбраны с. Атаманово и с. Большой Балчуг. Контрольные пробы отбирали выше по течению р. Енисей в районе с. Есаулово.

Материал и методы

Методы отбора, измерения проб и оценки полученных результатов

Отбор проб воды. Пробы воды отбирали в 2-литровые пластиковые бутылки из верхнего слоя речного стока (0–10 см) на расстоянии 40–60 м от береговой линии. Пробы фарватера отбирали на расстоянии 500 м от правого берега, в главном судоходном канале с наибольшей скоростью потока и глубиной более 5 м [17].

Таблица 1

Среднее содержание трития в филе рыб, отобранных в 2010–2012 гг. в р. Енисей, в зависимости от вида промысловых рыб и расстояния от Горно-химического комбината Красноярского края, Бк/кг сырого веса

Район отбора/расстояние от ГКХ, (км)	Хариус сибирский			Сиг		Стерлядь	
	2010	2011	2012	2010	2011	2011	2012
с. Есаулово (46)	12 ± 2	14 ± 3	13 ± 2	15 ± 3	13 ± 4	< МДА	< МДА
с. Атаманово (87)	14 ± 1	11 ± 2	12 ± 3	14 ± 2	< МДА	< МДА	< МДА
с. Ярцево (685)	< МДА	< МДА	< МДА	< МДА	< МДА	< МДА	16 ± 2
г. Игарка (1760)	< МДА	13 ± 4	< МДА	< МДА	12 ± 4	15 ± 3	17 ± 3

Примечание. Здесь и в табл. 2: * МДА – минимально детектируемая активность.

Отбор проб рыбы. Половозрелые особи хариуса сибирского (*Thymallus thymallus*), сига (*Coregonus lavaretus pidschian*), стерляди (*Acipenser ruthenus*), тугуна (*Coregonus tugun*) были отловлены на всех исследуемых участках реки Енисей в 2010–2013 гг. в рамках натурных исследований.

В рамках модельного эксперимента использовалась пресноводная лучепёрая рыба *Carassius gibelio* (серебряный карась) как представитель растениеядного рода карасей семейства карповых.

Тушки рыбы взвешивали для определения массы и измеряли длину каждой особи до и после эксперимента. После эксперимента у рыбы отделяли мышечные ткани, которые затем помещали в отгонную колбу, где смешивали с толуолом.

Методы измерения трития. Содержание общего трития в пробах определялась по известным методикам с применением устройства, сконструированного Л.Г. Бондаревой, которое успешно использовали для мониторинга трития в экосистеме р. Енисей [14, 17]. Содержание трития в исследуемых пробах определялась в Центре коллективного пользования Красноярского научного центра СО РАН с использованием жидкостно-цинтилляционного спектрометра Quantulus-1220 (США).

Модельный эксперимент по накоплению трития по пищевой цепочке вода–водные растения-гидробионты–рыба
В качестве биологического объекта для исследований взяли наиболее распространённый и используемый в пищу вид рыб – карась серебряный (*Carassius gibelio*). Рыбы этого семейства достаточно легко разводятся в искусственных водоёмах, а также мало прихотливы к качеству водоёма и потребляемой ими пище. В связи с этим, этот вид рыб нашел распространение в прудах-отстойниках, а также в прудах при тепловых станциях. Используемые в экспериментах особи имели массу 200 ± 15 г и длину

10 ± 2 см. Приблизительный возраст – 6 месяцев. Количество анализируемых особей составило 30 штук.

Основой для получения экспериментальной среды служила поверхностная вода, отобранная в р. Енисей. Воду для эксперимента предварительно готовили методом фильтрации через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм.

Для получения стандартизированных экспериментальных сред использовали стандартный раствор НТО (Packard Bioscience Ltd) с концентрацией 33 кБк/мл.

В качестве растений-гидробионтов, используемых в дальнейшем для питания рыбы, применяли роголистник и ряску. Ряску выращивали в лабораторных условиях, роголистник отобран в р. Енисей, в пункте отбора поверхностной воды для эксперимента. Для получения исходных данных проводили анализ водных растений, использованных в эксперименте, на содержание трития, микро- и макрокомпонентов.

Эксперимент проводили в два этапа: накопление и трансформация трития в биомассе водных растений (роголистник, ряска), накопление трития в организме рыб при использовании тритийсодержащих растений, полученных на первой стадии эксперимента. Экспериментальные исследования проводили в два этапа, которые организовали следующим образом.

Первый этап, подготовительный. Для получения экспериментальной среды, содержащей тритий, в аквариумы объемом 100 л вносили тритиевую воду в количестве 10 МБк. Тритий вносили в виде свободной тритиевой воды – НТО. Удельная активность полученного раствора составила 100 кБк/л. Затем туда помещали растения-гидробионты, масса которых (сырой вес) составила: роголистник – 3000 г, ряска – 3000 г. На первом этапе растения-гидробионты накапливали тритий в своей биомассе из экспериментальной среды. Процесс накопления растениями трития контролировался по остаточному содержанию его в экспериментальной водной среде.

Длительность экспериментов по накоплению трития растительной биомассой составляла от 168 ч для ряски и до 336 ч для роголистника. Окончание накопления фиксировали по выходу на насыщение линии убыли трития из водной среды плюс период стабилизации систем. Далее выявляли распределение трития между частями растений для этих двух видов растений. Рассчитали удельную активность по тритию растений-гидробионтов.

Растения, содержащие тритий, извлекали из экспериментальной среды, высушивали при температуре ~ 45 °С в атмосфере азота для предотвращения обмена трития с атмосферой лаборатории.

После чего полученные безводные концентраты смешали с сухим кормом для рыб, состоящим из смеси животных и растительных остатков (1:1). Смесь формовали в гранулы массой 0,3 г и хранили в герметичной упаковке до полного расходования в эксперименте. Содержание трития в каждой грануле составляло ~ 50 Бк.

Тритийсодержащие гранулы служили в качестве ежедневной добавки к рациону. Ежедневно в каждой экспериментальной си-

Таблица 2

Морфологические параметры биомассы для водных растений-гидробионтов в зависимости от времени контакта с экспериментальной средой и формы нахождения трития в пересчёте на сырой вес

Растение	Морфологические параметры				Содержание трития, Бк/кг, (%)			
	длина/площадь, см/см ²		масса, г		форма нахождения трития			
					НТО		ОСТ	
	0 ч	336 ч	0 ч	336 ч	0 ч	336 ч	0 ч	336 ч
Роголистник (n = 10):								
Конт.	5 ± 1/0	8 ± 2/0	2,5 ± 0,6	5,7 ± 0,5	1,0 ± 0,2(100)	1,0 ± 0,3(100)	< МДА	< МДА
Эксп.	5 ± 1/0	10 ± 1/0	2,5 ± 0,7	8,4 ± 0,8	1,0 ± 0,2(100)	2,2.104 ± 100 (79)	< МДА	6,0.103 ± 100 (21)
	0 ч	168 ч	0 ч	168 ч	0 ч	168 ч	0 ч	168 ч
Ряска (n = 10):								
Конт.	0/0,10 ± 0,06	0/0,18 ± 0,07	0,12 ± 0,05	0,17 ± 0,05	0,9 ± 0,5(100)	0,8 ± 0,6(100)	< МДА	< МДА
Эксп.	0/0,11 ± 0,07	0/0,25 ± 0,05	0,12 ± 0,06	0,21 ± 0,03	0,9 ± 0,5(100)	1,7.104 ± 100 (81)	< МДА	4,0.103 ± 100 (19)

стеме скармливали 600 Бк трития. При этом каждая гранула насильственно вносилась в ротовое отверстие каждой особи для максимального предотвращения потерь радионуклида. Максимальное количество трития, внесенное таким образом, составило 330 кБк на особь за эксперимент.

Также были созданы условия для проведения эксперимента, имитирующие природные условия проживания растений и рыбы. Аквариумы размещали в климатической камере объемом 1,6 м³, высотой 1,3 м, в которой имитировали следующие рабочие условия:

- скорость кондиционирования воздуха – 100 л/мин;
- влажность на уровне 50–70%;
- температура воды около ~15 °С;
- освещение – 29 ламп 58-W Phytон.

Выбранные условия проведения экспериментов явились оптимальными для минимального испарения с поверхности аквариумов, это подтверждают значения гигрометра, которые варьировались в диапазоне погрешности, установленной для данного вида оборудования. Влажность в течение всего времени экспериментов реально не превышала 70%.

Второй этап, исследовательский. На этом этапе исследования эксперимент проводили в трех аквариумах: двух рабочих и одном контрольном.

В 2 аквариума, которые заполняли такой же свежешелюванной водой, как для метки растений-гидробионтов, помещали исследуемые особи рыбы. Кормление рыбы проводили кормом с добавлением прикорма в виде тритийсодержащих гранул, подготовленных в первой части эксперимента. В первый аквариум добавляли гранулы с ряской, во второй – с роголистником. Третий аквариум служил в качестве контроля – в корм этих рыб не добавляли меченые тритием растения.

Продолжительность второй части эксперимента составляла 550 суток с промежуточным отбором из каждого аквариума по три особи рыбы через 250 сут. Такой график отбора и продолжительность эксперимента выбрали с учетом того, что тритий, находящийся в необменной форме, имеет период полувыведения около 500 сут.

При отборе рыбы из аквариума её вынимали из воды и аккуратно высушивали бумажными полотенцами, но не промывали. После этого каждую особь измеряли и взвешивали.

Для всей рыбы, участвовавшей в эксперименте, проводили препарирование на фрагменты: чешуя, кожа с плавниками, жабры, скелет вместе с головой, мышечная масса, кишечник со всем содержимым, желудок со всем содержимым.

Мышечную массу каждой особи взвешивали и разделяли на 3 части: из одной части определяли содержание общего трития, вторую часть использовали для определения содержания трития, связанного с липидами.

Особей, находившихся в контрольной системе, анализировали на общее содержание липидов, золь, видов и массы белков. В составных частях экспериментальных особей определяли содержание связанного с ними трития.

Результаты и обсуждение

Полученные ранее натурные данные по содержанию трития в филе некоторых видов промысловых рыб р. Енисей представлены в табл. 1.

Кроме того, провели единичный анализ содержания трития в мышечных тканях тугуна (*Coregonus tugen* (Pallas)), выловленного в районе с. Ярцево, содержание в филе которого составило ~18 Бк/кг сырого веса.

Полученные данные показывают, что значимой динамики изменения содержания трития в мышечной массе рыбы за исследованный период не наблюдалось.

Содержание трития в мышечной ткани рыб не зависит от вида рыб как и от района вылова особей. Предположительно это обусловлено тем, что исследуемые виды рыб имеют одинаковый рацион питания [18]. Следовательно, основным источником поступления трития является пища.

Содержание трития в липидах и белках мышечной ткани рыбы в зависимости от типа растения-гидробионта, используемого для питания (*n* = 3)

Растения-гидробионты	Контроль		Эксперимент			
	содержание через 550 суток, г/ кг мышечной ткани		содержание трития, Бк/г мышечной ткани			
			250-е сутки		550-е сутки	
	белки	липиды	в белках	в липидах	в белках	в липидах
Роголистник	128 ± 8	104 ± 6	47 ± 4	39 ± 5	112 ± 9	101 ± 6
Ряска	138 ± 11	105 ± 7	40 ± 3	33 ± 7	125 ± 8	98 ± 5

Для подтверждения этого пищевого источника поступления трития в организм рыбы провели длительные модельные эксперименты. Для определения процесса накопления трития по пищевой цепочке «водные растения-гидробионты-рыбы» провели 2-этапный модельный эксперимент, методология проведения которого описана выше.

Прежде всего, провели исследование распределения трития между видами растений и способом локализации трития в растениях в виде НТО или в виде ОСТ. Оценку локализации трития провели также по величине морфологических изменений биомассы исследуемых растений. В табл. 2 представлены полученные результаты.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что доля трития в виде ОСТ в биомассе растений составила 19–21% от общего накопления трития в ходе экспериментов в водных растениях-гидробионтах. При этом внешний вид и морфология практически всех растений были удовлетворительными, наблюдался заметный прирост биомассы от 2,5 до 5,7 – 8,4 г (роголистник) и от 0,12 до 0,17 – 0,21 г (ряска), которые составляют около 100% от исходной массы как для контрольных проб, так и для участвующих в эксперименте.

В количественном соотношении содержание мышечной ткани каждой особи варьируется в пределах 40–50% от общей массы рыбы [6]. Значит, при потреблении рыбы человеком основной дозобразующей частью является, главным образом, мышечная ткань. Исходя из этого, провели исследование по выявлению содержания трития именно с этой части рыб, с выделением белков и липидов и последующей оценкой доли радионуклида, связанного с этими компонентами. Исследования по составу мышечной ткани, проведенные для 10 особей, показали, что они состояли в среднем из белков 16 ± 1%, воды – 70 ± 2%, жиров – 13 ± 1%, золь ~ 1%.

В табл. 3 приведены результаты распределения трития между липидами и белками рыбы в экспериментах.

Как видно из представленных в табл. 3 данных, содержание трития в липидах и белках мышечной ткани рыбы увеличивается пропорционально времени потребления трития с пищей. Полученные результаты не выявили значимых различий в накоплении трития в системах с ряской и роголистником. Динамика связывания трития с белками и липидами практически одинакова. Отсюда следует заключение о том, что оба эти растения одинаково переваривались в органах пищеварения исследуемых видов рыб.

Выводы

1. Полученные данные в натурном эксперименте показали, что содержание трития в мышечной ткани рыб не зависит ни от вида рыб, ни от района вылова особей. Можно предположить, что исследуемые виды рыб имеют одинаковый рацион питания и основным источником поступления трития является пища.

2. Длительные модельные эксперименты подтвердили пищевой путь поступления трития в особи рыб через водные растения-гидробионты на примере роголистника и ряски, которые активно аккумулируют тритий из поверхностной воды.

3. В ходе экспериментов было выявлено, что до 70% трития из воды переходит в биомассу растений. Накопление трития в растениях-гидробионтах в количестве до 2,0•10⁴ Бк/кг не повлияло на морфологические параметры растений. В контрольных

пробах и участвующих в эксперименте растений наблюдалась положительная динамика в увеличении их длины, площади и массы прироста: масса каждого растения роголистника и ряски увеличилась примерно в 2 раза. При этом часть от всего накопившегося трития перешла в биомассу растений в виде ОСТ, и это содержание составило до 21% общего содержания.

4. Экспериментально выяснено, что тритий из пищи переходит в особи рыбы и что около 75% от всего накопленного количества трития в тканях рыб присутствовало в мышечной ткани. При определении содержания трития в белках и липидах в экспериментальных системах не выявлено особенностей в использовании роголистника и ряски как источника питания.

5. Подтверждено, что основным источником поступления трития является пища, обогащенная тритием.

Финансирование. Работы выполнены при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-05-00205.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература (п.п. 1, 3–17 см. References)

2. Катрич И.Ю. Мониторинг трития в природных водах СССР (России): Автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. Обнинск; 2009.
18. Зуев И.В., Семёнова Е.М., Шулепина С.П., Резник К.А., Трофимова Е.А., Шадрин Е.Н. и др. Питание хариуса *Thymallus Sp.* в среднем течении р. Енисей. Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2011; 4(3): 281–92.

References

1. Environmental Isotope Data: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation. Vienna: IAEA; 1979.
2. Katrich I.Yu. Tritium monitoring in natural waters of the USSR (Russia): Diss. Obninsk; 2009. (in Russian)
3. UNSCEAR Document A/AC.82/R.360: Contamination from Nuclear Explosions. UNSCEAR; 1979.

4. The Tritium Systems Test Assembly at the Los Alamos National Laboratory, Los Alamos National Security, Benefits LANL, NNSA & National Security, DOE. Los Alamos; 2002.
5. Report and Advice on the Ontario Drinking Water Quality Standard for Tritium. Toronto: Ontario Drinking Water Advisory Council; 2009.
6. Park J.W., Lanier T.C. Processing of surimi and surimi seafood. In: Martin R.E., ed. Marine Freshwater Products Handbook. Lancaster: Technomic, 2000.
7. Benedict B.C., Bradshaw C. Bioaccumulation of tritiated water in phytoplankton and trophic transfer of organically bound tritium to the blue mussel, *Mytilus edulis*. J. Environ. Radioact. 2013; 115: 28–33.
8. Davis P., Galeriu D. Environmental Radioactivity and Ecotoxicology of Radioactive Substances. Berlin: Springer; 2011.
9. Galeriu D. Tritium. Radionuclides in the Environment. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.; 2010.
10. Galeriu D., Melintescu A. Tritium in Radionuclides in the Environment. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.; 2010.
11. Galeriu D., Heling R., Melintescu A. The dynamics of tritium – including OBT – in the aquatic food chain. Fusion Sci. Technol. 2005; 48: 779–82.
12. Kim S.B., Shultz C., Stuart M., McNamara E., Festarini A., Bureau D.P. Organically bound tritium (OBT) formation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): HTO and OBT-spiked food exposure experiments. Appl. Radiat. Isot. 2013; 72: 114–22.
13. König L.A. Tritium in the food chain. Radiat. Prot. Dosimetry. 1990; (2): 77–86.
14. Bondareva L. Natural Occurrence of Tritium in the Ecosystem of the Yenisei River. Fusion Sci. Technol. 2011; (4): 1304–7.
15. Bondareva L., Zeer G., Gerasimov V., Zhizaev A. Technogenic pollution and its migration in the water flow of the Yenisei River. River Systems. 2013; (3-4): 149–56.
16. Bolsunovsky A.Ya., Bondareva L.G. Tritium in surface waters of the Yenisei River basin. J. Environ. Radioact. 2003; 66: 285–94.
17. Bondareva L.G. Tritium Content of Some Components of the Middle Yenisei Ecosystem. Radiochemistry. 2015; (5): 557–63.
18. Zuev I.V., Semenova E.M., Shulepina S.P., Reznik K.A., Trofimova E.A., Shadrin E.N., et al. Feeding Composition of Grayling *Thymallus Sp.* in the Middle Reach of the Yenisei River. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya. 2011; 4(3): 281–92. (in Russian)

Поступила 17.06.17

Принята к печати 05.07.17

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

УДК 612.821.014.426.084

Лукьянова С.Н., Карпикова Н.И., Григорьев Ю.Г., Веселовский И.А.

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НЕТЕПЛОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, 123182, Москва

Настоящая статья – совокупность материалов собственных исследований реакций мозга человека на электромагнитные поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) нетепловой интенсивности. Результаты исследований с участием добровольцев представили характеристику реакции ЦНС на кратковременные облучения ЭМП РЧ промышленного генератора и различных стандартов сотовой связи в условиях, преимущественно, облучения головы. Дана оценка физиологической значимости этих эффектов и показана их зависимость от типологических особенностей электроэнцефалограммы (ЭЭГ) человека. Обследование людей, работающих в условиях хронического облучения ЭМП РЧ, позволило представить зависимость соответствующих нейроэффектов от стажа работы.

Ключевые слова: электромагнитное поле; нетепловая интенсивность; испытуемые; острое облучение; реакция ЦНС; типологические особенности ЭЭГ; обследование работающих; стаж работы; функциональное состояние.

Для цитирования: Лукьянова С.Н., Карпикова Н.И., Григорьев Ю.Г., Веселовский И.А. Изучение реакций мозга человека на электромагнитные поля нетепловой интенсивности. Гигиена и санитария. 2017; 96(9): 848–854. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-848-854>

Для корреспонденции: Лукьянова Светлана Николаевна, д-р биол. наук, проф. ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, 123182, Москва. E-mail: lukyjanovasn@yandex.ru

Lukyanova S.N., Karpikova N.I., Grigoryev Yu.G., Veselovskiy I.A.

THE STUDY OF RESPONSES OF THE HUMAN BRAIN TO ELECTROMAGNETIC FIELD OF NON-THERMAL INTENSITY

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Centre, Moscow, 123182, Russian Federation

This article is an array of materials of own research of the responses of the human brain to radio frequency electromagnetic fields (EMF RF) of non-thermal intensity. The results of studies with the participation of volunteers presented a characterization of the response of the central nervous system to short-term exposures to EMF RF from the